

分布式光纤法布里-帕罗传感器在飞行器智能蒙皮中的应用

杨林*

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 从智能蒙皮的概念出发, 分析了光纤法布里-帕罗式结构的传感技术的原理, 研究了在飞行器上装载分布式光纤传感器进行压力、温度等的实时传感、动态测量的工程实现方法, 并探讨了其技术优势与发展方向。应用分布式光纤法布里-帕罗传感器可解决航电集成化、抗电磁干扰、减少负载等问题。

关键词: 智能蒙皮; 法布里-帕罗腔; 分布式光纤

中图分类号: V249.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2016) 06-0075-04

未来战争复杂严峻, 多维战场环境日新月异, 对装备生存能力的要求越来越高; 另一方面, 飞行器设计也逐渐向集成化、多用途化发展。这两点都对载荷、空间有限的航空装备平台的设计工作构成了挑战, 而智能蒙皮概念及新型光器件在其中的应用可以提供一个理想的解决方案。

智能蒙皮是 20 世纪 80 年代由美国空军提出的新技术构想, 旨在装备的外壳内植入智能结构以用于监视、预警、隐身和通信等, 其中尤以结合光纤的智能蒙皮技术应用最广泛, 受到各国重视。目前这一技术的发展以美国主导, 已在包括 F22, F35, F18 升级型及 X 系列等多种机型上测试及应用^[1]。欧盟、日本等国均投入大量研究。

一般来说, 广义的智能蒙皮定义为, 将探测元件、驱动元件或微处理控制系统与机体材料相融合, 通过与电、磁、热、光、声、流变、机械运动等物理量耦合并感知这些量的变化以完成传感或动作^[2] 两大功能的结构及单元所组成的具有识别、分析、判断、反应等功能的蒙皮结构。不仅具有传统蒙皮承受载荷、维持机体气动外形、保护内部器件的作用, 还具有强化隐身、减震降噪、感知环境、收发信息等功能。

结合光纤器件的智能蒙皮是这类新型蒙皮中最可行、最受关注的^[3,4], 这里从智能蒙皮在飞行器上的应用着手, 运用光纤法布里-帕罗传感器^[5] 基本原理, 对这一智能蒙皮系

统的设计和分布式光纤传感系统的工程实现进行研究。

1 光纤法布里-帕罗传感技术原理

法布里-帕罗传感是一种基于薄膜分振幅干涉原理以实现不等强度的多光束干涉的传感装置, 如图 1 所示。其主要结构是一对平行放置的高反射薄膜, 其反射率 R_1, R_2 接近等于 1, 折射率设为 T_1, T_2 , 内部反射面与理想几何平面的平滑度偏差不得超过 $1/20$ 波长。两薄膜之间的空间形成腔体, 即 F-P 腔, 腔长为 L , 腔内介质折射率为 n , 入射光为 I_i , F-P 腔输出的反射光强与透射光强分别为 I_R 和 I_T 。

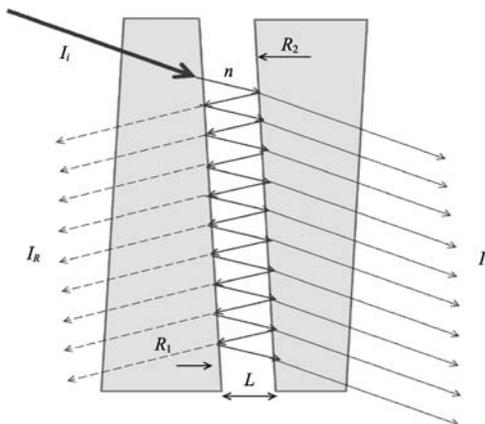


图 1 法布里-帕罗腔原理

Fig.1 The schematic diagram of Fabry-Perot cavity

收稿日期: 2016-03-22 退修日期: 2016-05-05 录用日期: 2016-05-16

* 通讯作者. Tel: 029-86832908 E-mail: oyyz@qq.com

引用格式: YANG Lin. Application of distributed optical fiber Fabry-Perot sensor in aircraft intelligent skin [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (06): 75-78. 杨林. 分布式光纤法布里-帕罗传感器在飞行器智能蒙皮中的应用 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (06): 75-78.

根据光纤光学理论^[6]可以得到, F-P腔的总体反射率 R_{FP} 与折射率 T_{FP} 分别满足:

$$\begin{cases} R_{FP} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \theta}{1 + R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \theta} \\ T_{FP} = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为经过 F-P 腔往返一次产生的相位移, $\theta=4\pi nL/\lambda$ 。

假设 $R_1 \approx R_2=R$, 且按照多光束干涉原理, 可以得到 F-P 腔输出的反射光强与透射光强分别为:

$$\begin{cases} I_R = \frac{2R \left(1 - \cos \frac{4\pi nL}{2\lambda} \right)}{1 + R^2 - 2R \cos \frac{4\pi nL}{2\lambda}} I_i \\ I_T = \frac{(1-R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos \frac{4\pi nL}{2\lambda}} I_i \end{cases} \quad (2)$$

R_1 与 R_2 之间的差别很小时 (如 $\leq 5\%$), 反射光强的表达式可以简化为:

$$I_r = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi nL}{2\lambda} \right) I_i \quad (3)$$

从式 (3) 可知, 当入射光波长 λ 与强度 I_i 一定时, F-P 腔腔长 L 是输出光强与腔内介质折射率的函数, 因此, 可以通过测量光纤输出光的强度 I_r 的变化, 分析计算得到腔长的相应变化量, 即感知应变、压力、压强等参数; 这是反射式光纤法布里-帕罗压力传感的基本原理。

同理, 根据式 (2) 中透射光强 I_T 与各参数的关系, 也可以采用折射率对温度变化敏感的材料构成法布里-帕罗腔内的介质, 在固定腔长 L 与入射光波长 λ 与强度 I_i 时, 根据温度变化引起折射率变化的曲线, 测得输出光强度 I_T 的变化, 进而感知温度变化; 这是透射式光纤法布里-帕罗温度传感的基本原理。

2 分布式光纤法布里-帕罗传感系统的工程实现

2.1 透射式法布里-帕罗温度传感器

考虑实际应用的情况, 可通过在蒙皮内平行埋置光纤传感器实现透射式温度传感的功能。基于光纤透射式法布里-帕罗温度传感器的智能蒙皮的微结构如图 2 所示。

在由高反射膜围成的 F-P 腔两侧分别接上一根单模光纤和一根多模光纤, 器件的连接处由中空管包裹 (可以是金属或玻璃材料), 整体埋置于蒙皮表面之下, 与蒙皮平行。单模光纤端接激光器光源, 光线经过腔体谐振后被多模光纤

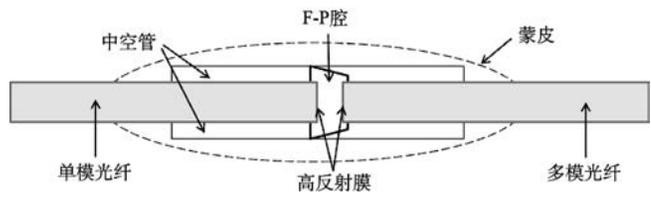
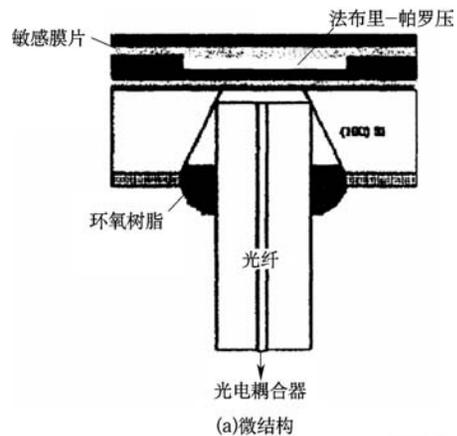


图 2 蒙皮中埋置光纤法布里-帕罗传感器的微结构
Fig.2 The illustrative diagram of microstructure of fiber F-P sensor in aircraft's skin

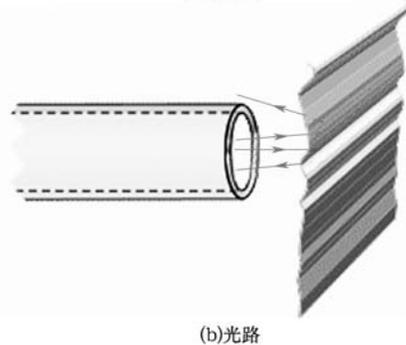
接收, 之后由光电探测器 (PD, PMT, APD 等) 测定其光强。当蒙皮所处的物理环境 (如温度等) 由于飞行状态变化而发生变化时, F-P 腔内的折射率也会因温度而变化, 多光束干涉得到的透射光信号强度也将随之变化, 通过数据采集器, 光谱仪及计算机处理收集到的光强变化即可得到所需感知的环境温度变化情况。

2.2 反射式法布里-帕罗压力传感器

反射式法布里-帕罗压力传感器在飞行器上可用如图 3 (a) 所示的微结构实现, 光纤垂直埋置在缓冲材料及蒙皮复合材料之中, 下端连接光电耦合器, 上端镀反射层与蒙皮下的敏感膜片及全反射层形成 F-P 腔。如图 3 (b), 光路由光纤出射被蒙皮下的反射层又反射回光纤, 被光电耦合器



(a)微结构



(b)光路

图 3 蒙皮中内嵌反射式法布里-帕罗传感器
Fig.3 Built-in reflective F-P sensor in aircraft skin

耦合后由探测器探测到光强,当蒙皮发生形变时,会引发F-P腔腔长发生变化,进而改变反射光强,通过分析解算光强的变化就可以得到所需飞行参量。

这种结构的优势在于复合结构内嵌于蒙皮之中,只采用单根光纤测量反射光强而不是透射光强,更适合全飞行器分布式测量,实时动态监测全机各部位的状态变化。

2.3 分布式光纤传感智能蒙皮系统

光纤传感较其他传感相比的一个重要优势是能够同时对多物理量综合检测,理论上单根光纤就能测量各区域分布的多点;结合波分复用技术,可以大大减少布线、减轻重量、方便安装,故极其适合于对空间、重量有严格限制的飞行器采用,运用光纤法布里-帕罗温度传感器与压力传感器,可以构建分布式光纤传感智能蒙皮系统。

将分布式光纤技术、光复用技术与光纤传感技术相结合,可以组成分布式光纤传感系统,如图4所示。系统由光源、光谱仪、计算机、光电耦合器、粗波分复用器(Coarse Wavelength Division Multiplexer, CWDM)及传感器等组成。将传感光纤沿被测场分布,对被测场的空间行为(压力、应变)和时间行为(温度变化)进行实时监测。首先由光源提供适合在所选光纤内低损耗传输的特定波长光束,经CWDM波分复用后传入在蒙皮内的光纤法布里-帕罗传感器感应区间,感知不同位置的的压力,温度变化信息,再经由光电耦合器耦合入传感总线,经解复用后由光电探测器及光谱仪接受,再由计算机解析后提取所需的温度、压力变化,完成状态监测。根据所选用的法布里-帕罗传感器类型,分布式光纤传感智能蒙皮系统可分为分布式应力传感系统和分布式温度传感系统。

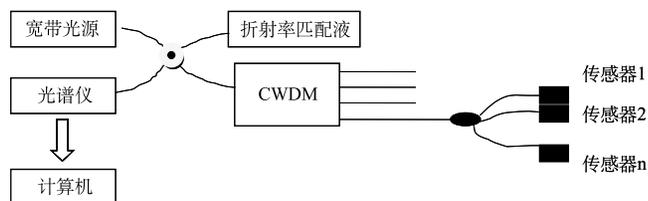


图4 分布式光纤传感网络原理示意图

Fig.4 The schematic diagram of distributed optical fiber sensing network

构想的基于分布式光纤传感的智能蒙皮系统如图5所示。将分布式光纤传感网络融合入飞行器特定区域的蒙皮中,光纤既是传感单元又是传输媒介,系统中结合波分复用技术及分布式技术,在波分复用或时分复用的情况下,多个传感光纤只需一根光纤数据总线。在实现全光网络抗干扰

的同时对物理量分布式测量。波分复用器和光谱仪、光电探测器将包含实时温度/压力等信息的光信号从噪声中提取并解调分析得到所需参量。图5中的嵌入透射式光纤法布里-帕罗温度传感元的蒙皮传感系统,可以探测布测区域透射光强度的变化,可以获得对应的温度场分布;嵌入反射式光纤法布里-帕罗压力传感元的蒙皮传感系统,可以测量光纤中光波后向光的变化,可对发生变化的点进行定位,进而得到区域的压力分布变化。

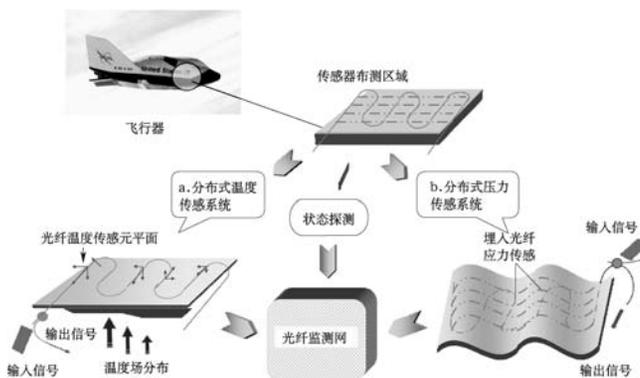


图5 基于分布式光纤传感的智能蒙皮系统

Fig.5 The smart skin system based on distributed fiber sensing

光纤法布里-帕罗传感器是组成分布式传感网络的神经元,利用分布式光纤传感智能蒙皮系统所组建的状态实时监测网,可以完成飞行器在极端恶劣的飞行环境及异常困难的飞行状态中的智能态势感知。

3 技术优势

光纤法布里-帕罗传感器本身具有众多优点,其灵敏度高,动态范围大,具有高精度的定位能力,高效的传感灵敏度,固有的抗干扰能力、以及简单的结构。同时,光纤不仅是智能蒙皮的神经单元,作为由基于光纤所构成的智能蒙皮系统,因而也具有以下技术优势:

- (1) 减轻飞行器重量,节省空间,简化设计,提高线缆集成度;
- (2) 有助于射频信号的发射与接收;
- (3) 提高飞行器的抗电磁干扰能力,减少外部特征;
- (4) 提高飞行器飞行性能与可靠性。

4 结束语

分析的基于分布式光纤法布里-帕罗传感的智能蒙皮系统,可用于飞行器应变、温度等物理量的连续实时的安全检测,对于未来飞行器的航电集成、抗干扰、智能控制、感知

与探测的技术发展具有参考意义。

作为一项多学科交叉的技术,智能蒙皮涉及光电子学,材料学,结构动力学、阵列共型天线技术、通信网络、分布并行处理等;除了文中研究的智能蒙皮传感系统,其主要研究方向还包括:可变智能蒙皮共型天线与智能隐身、融合型智能蒙皮微型MEMS,智能蒙皮相控阵等。对于分布式光纤法布里-帕罗智能蒙皮系统,未来可能与微制动阵列单元相结合,实现感知-分析-决策-控制闭环的自适应飞行控制。

AST

参考文献

- [1] 王奔,段玉岗,李涤尘. 智能蒙皮/结构技术进展 [J]. 国际航空, 2015 (5): 78-79.
- WANG Ben, DUAN Yugang, LI Dichen. Smart skin/structure in advance aircraft [J]. International Aviation, 2015 (5): 78-79. (in Chinese)
- [2] 杨士斌,徐敏. 智能蒙皮飞行器的飞行控制研究 [J]. 飞行力学, 2007, 25 (1).
- YANG Shibin, XU Min. Research on flight control of a smart skin aircraft [J]. Flight Dynamics, 2007, 25 (1). (in Chinese)
- [3] 杨跃轮. 光纤传感器在军事上的应用 [J]. 信息化研究, 2010, 36 (5).
- YANG Yuelun. Application of optic-fiber sensor on military affairs [J]. Informatization Research, 2010, 36 (5). (in Chinese)
- [4] 常飞,韩庆,尚柏林. 光纤技术在军用飞机结构健康监测中的研究 [J]. 科学技术与工程, 2008, 8 (10).
- CHANG Fei, HAN Qing, SHANG Bolin. Application of FBG on flight vehicle structural health monitoring systems [J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8 (10). (in Chinese)
- [5] 杨建良,郭照南. 用于灵巧结构的光纤法布里-帕罗传感器 [J]. 应用光学, 1997, 18 (9).
- YANG Jianliang, GUO Zhaonan. Optical fiber Fabry-Perot sensors used for smart structure [J]. Journal of Applied Optics, 1997, 18 (9). (in Chinese)
- [6] 饶云江. 光纤技术 [M]. 科学出版社, 2006: 234-251.
- RAO Yunjiang. Optical fiber technology [M]. Science Press, 2006: 234-251. (in Chinese)

作者简介

杨林 (1989—) 男,助理工程师。主要研究方向:综合射频系统设计工作。

Tel: 029-86832908

E-mail: oyyz@qq.com

Application of Distributed Optical Fiber Fabry-Perot Sensor in Aircraft Intelligent Skin

YANG Lin*

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: According to the concept of intelligent skin, this article analyzed the fundamental principle of optical fiber Fabry-Perot structure, and focused on implementation method to mount the distributed optical fiber sensors for pressure and temperature real-time monitoring on aircraft. The technological advantages and development trend of the topic were also briefly discussed. For solving the problems, e.g., avionics integration, anti-electromagnetic interference, and compaction, this kind of sensing system's framework can be well established and embedded into intelligent skin.

Key Words: intelligent skin; Fabry-Perot cavity; distributed optical fiber

Received: 2016-03-22; Revised: 2016-05-05; Accepted: 2016-05-16

*Corresponding author. Tel. : 029-86832908 E-mail: oyyz@qq.com